

文章编号: 1001 - 893X(2011)08 - 0138 - 05

# 新型三等分 Wilkinson 功分器在高效率功放中的应用\*

陈 慰<sup>1</sup>, 陶学敏<sup>2</sup>, 赵 娜<sup>1</sup>

(1. 航天恒星空间技术应用有限公司, 西安 710077; 2. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**针对一种新型的三路 Doherty 功率放大器, 为满足其对称结构要求, 在传统对称结构二等分功分器基础上, 结合三路 Doherty 功放电路尺寸, 通过理论计算和采用 ADS 软件仿真的方法设计了对称结构三等分 Wilkinson 功分器。其尺寸为 19 mm × 11 mm, 在 2.11 ~ 2.17 GHz 内, 插入损耗小于 0.4 dB, 输出端口隔离度大于 16 dB, 端口回波损耗大于 13 dB。在适应三路 Doherty 功放对称结构的前提下, 功分器性能指标满足功放电路三路相位一致性设计要求, 提高了放大器工作效率, 测试结果显示饱和点工作效率高于两路 Doherty 功率放大器。

**关键词:**高效率功放; Wilkinson 功分器; 对称结构; 相位一致性

中图分类号: TN73 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001 - 893x.2011.08.029

## Application of New Trisected Wilkinson Power Divider in High Efficiency Power Amplifier

CHEN Wei<sup>1</sup>, TAO Xue-min<sup>2</sup>, ZHAO Na<sup>1</sup>

(1. Space Star Aerospace Technology Applications Co., Ltd., Xi'an 710077, China;  
2. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** In a new three-way Doherty PA (Power Amplifier) design, based on the traditional symmetrical structure power divider and according to the circuit size of the new PA, a trisected Wilkinson power divider with symmetrical structure is designed through theoretical calculation and simulation using ADS software. The size of the new power divider is 19 mm × 11 mm, in 2.11 ~ 2.17 GHz, the insertion loss is less than 0.4 dB, the isolation is more than 16 dB, and the return loss is more than 13 dB. On the basis of suiting for the structure of the three-way Doherty PA, the new power divider meets the phase constance design requirements of the PA circuit and improves the efficiency of the PA. The test results show that the efficiency of saturation power is higher than that of the two-way Doherty power amplifiers.

**Key words:** high efficiency power amplifier; Wilkinson power divider; symmetrical structure; phase constance

### 1 引言

Doherty 功率放大器理论于 1936 年由 William H. Doherty 在贝尔实验室提出<sup>[1-2]</sup>, 已经成为高效率、高线性射频功放的主要实现形式之一。各类 Doherty 功率放大器电路前端和末端均需要功率分配和合成网络对大功率射频信号进行功率分配和合

成。大功率合成技术主要有管芯合成、电路合成和空间合成以及其它合成形式<sup>[3-4]</sup>, 其中以固态器件为合成单元的电路级合成由于尺寸加工简单、不易受波长等限制而得到了广泛的应用。在电路级合成中, 相对于分支器电桥、Lange 耦合器、环形电桥等 3 dB 电桥来讲, Wilkinson 电桥的优点是电路制作工艺容易, 结构简单, 成本低廉, 隔离端口无接地要求, 电

\* 收稿日期: 2011 - 03 - 21; 修回日期: 2011 - 05 - 10

路的对称性保证了信号的一致性和隔离度,隔离电阻可以进一步提高输出端口的隔离度等指标<sup>[5]</sup>。微带功分器按结构分为二进制或者累进制等,按能量分配比分为等分的和不等分的,按分配路数分为两路、三路、四路,以及由它们级联形成的多路功率分配器<sup>[6]</sup>。

二进制功分器结构简单,理论分析容易,实际工程中应用比较广泛。两路等分 Wilkinson 功分器一般采用二进制的对称结构设计,三路等分功分器通常情况下也是采用二进制的设计方法,这样设计虽然结构简单,易于实现,但是几何尺寸上不对称,三路相位一致性较差。为了应用于新型对称结构三路 Doherty 高效率射频功率放大器,本文采用累进制设计思路,提出一种对称结构三路等分 Wilkinson 功分器,主要采用 ADS 软件联合电磁仿真设计该三路等分功分器,满足对称结构设计要求,同时满足 Doherty 功放对三路射频信号相位一致性的要求。

## 2 三路功分器设计原理

Doherty 功放前端的功率分配电路用于实现射频信号的功率分配,可以由集成贴片电桥器件来实现,也可以由 Wilkinson 微带功分器实现。在功放电路设计过程中,微带功分器的设计可以直接和功放电路同时进行 PCB 版图设计,相对于集成贴片电桥,有制造加工成本低和电路可靠性高的优点。

本文设计的对称结构三路 Doherty 功放其电路原理如图 1 所示,工作频段为 2 011 ~ 2 017 MHz,它由一个 Carrier 路功放和两个 Peak 路功放组成。当输入射频信号功率较小时,Carrier 路处于 AB 类工作状态;当 Carrier 路输出功率接近饱和时,上下两路 Peak 功放也同时开始工作,它们工作于 C 类状态。

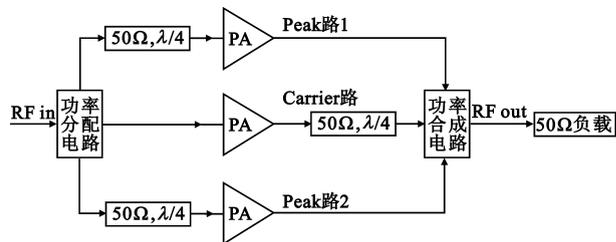


图 1 对称结构三路 Doherty 功放示意图  
Fig.1 Geometry of symmetrical three-way Doherty PA

三路 Doherty 功放前端的功率分配电路同样可以由 Wilkinson 微带功分器来实现。传统的三等分微带功分器设计常采用二进制方法设计,如图 2 所示,即先实现 1:2 的不等功分,再实现第 2 分支的

1:1 等功分,这样二次分配来实现 1:1:1 的功率三等分。这样的功分器虽然结构简单、易于实现、隔离度高,但是有结构不对称、三路相位一致性差的缺点。为了满足三路 Doherty 功放的对称结构,设计的功分器也必须是对称结构的。三路 Doherty 功放上下两路 Peak 功放在大功率情况下要求工作开启时延一致,才能保证放大器得到高效率,这样就要求功分器 3 个电臂具有很高的相位一致性,特别是上下两臂的相位要求非常一致,因此也只能是对称结构才能够满足这样的要求。

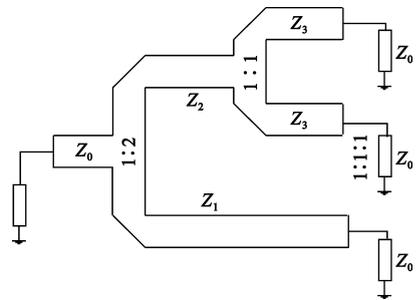


图 2 不对称三路功分器示意图  
Fig.2 Geometry of asymmetrical three-way power divider

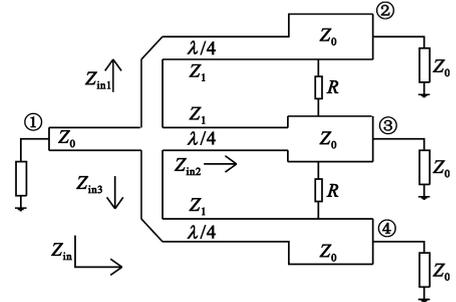


图 3 对称结构三路功分器示意图  
Fig.3 Geometry of symmetrical three-way power divider

本文设计的新型对称结构三路等分 Wilkinson 微带功分器的工作频段为 2 011 ~ 2 017 MHz,微带电路板采用美国 Rogers 公司型号为 Rogers4350B 的 PCB 板材,介质相对介电常数  $\epsilon_r = 3.48$ ,介质厚度  $h = 0.762 \text{ mm}$ ,微带线金属铜厚  $t = 70 \mu\text{m}$ ,介质损耗正切  $\tan \delta = 0.0037$ 。根据三路功分器的理论和三路 Doherty 功放的尺寸限制,计算出微带线的基本参数初值<sup>[7]</sup>。如图 3 所示,设功分器输入端口源阻抗和三路终端负载阻抗均为  $Z_0 = 50 \Omega$ ,由阻抗匹配理论可知,分支处的阻抗并联后应等于  $50 \Omega$ ,即从输入端口看向功分网络应该有

$$Z_{in} = Z_0 = 50 \Omega \quad (1)$$

由于功率三等分,可得三路功分比为

$$S_{21} = S_{31} = S_{41} = -10 \lg(1/3) \approx -4.77 \text{ dB} \quad (2)$$

三条  $\lambda/4$  分支线的阻抗为

$$Z_{in1} = Z_{in2} = Z_{in3} = 150 \Omega \quad (3)$$

这样,通过  $\lambda/4$  阻抗变换器实现了从输入端口的源阻抗到 3 个输出端口的负载阻抗的阻抗匹配。

### 3 功分器 ADS 仿真模型的建立

根据理论分析计算的结果,结合 Rogers4350B 板材的参数可以计算得到工作频段中心频点  $f_0 = 2.140 \text{ MHz}$  的特征阻抗  $Z_0 = 50 \Omega$  微带线宽度约为  $w_0 \approx 1.65 \text{ mm}$ ,  $\lambda/4$  阻抗变换器  $Z_1 = 150 \Omega$  微带线宽度约为  $w_1 \approx 0.60 \text{ mm}$ , 该频点  $\lambda/4$  线长约为  $L \approx 21.34 \text{ mm}$ 。利用 ADS 软件进行电路原理图仿真和版图电磁联合仿真,其 ADS 电路原理图仿真如图 4 所示,ADS 版图仿真如图 5 所示。

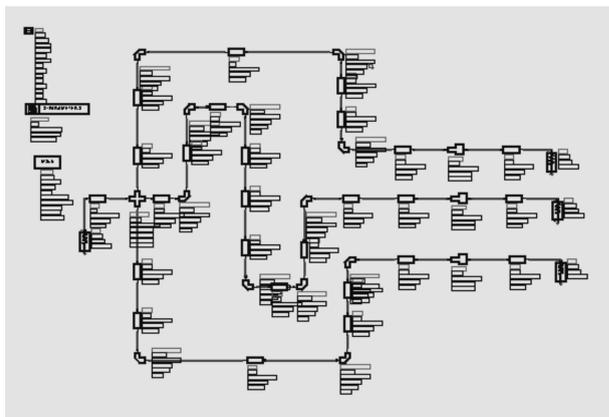


图 4 功分器 ADS 电路原理图仿真

Fig.4 ADS schematic simulation of power divider

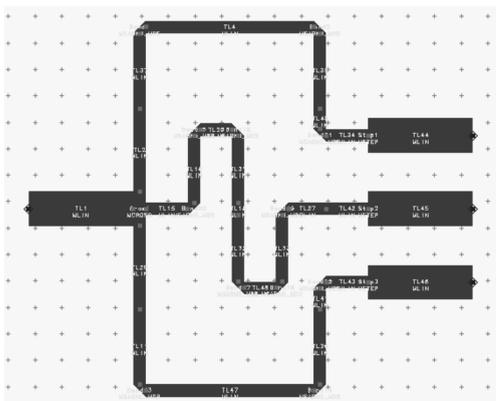


图 5 功分器 ADS 版图仿真

Fig.5 ADS layout simulation of power divider

进行 ADS 仿真参数优化时需要考虑功分器结构的对称,电臂④由电臂②镜像产生,以确保结构尺寸

完全一致,然后优化电臂③的尺寸,同时还需要考虑电臂③的拐弯次数,拐弯增多所带来不连续效应,以及电臂②和④之间的距离所带来的耦合作用等因素。

### 4 仿真测试结果与讨论

对称结构三等分 Wilkinson 功分器电路 ADS 电磁联合仿真结果如图 6~8 所示。从仿真结果看,在工作频率内,插入损耗最小为 0.3 dB,最大不超过 0.4 dB,且三路功率分配相差小于 0.01 dB,三路功率分配比非常一致。通过优化电臂尺寸和隔离电阻阻值  $R$ ,在中心频点处,电臂②和④的插入损耗  $S_{21} = S_{41}$ ,使得上下两路 Peak 功放输入链路的损耗相等,这说明设计的对称结构起到了关键作用。在工作频段内,输入端口①的回波损耗小于  $-13 \text{ dB}$ ,输出端口②、③、④的回波损耗在  $-25 \sim -29 \text{ dB}$  之间。输出端口②和④之间隔离度小于  $-16 \text{ dB}$ ,输出端口②和③之间、②和④之间隔离度小于  $-19 \text{ dB}$ ,且隔离度  $S_{23} = S_{34}$ ,再次证明对称结构在该功分器设计中起到的关键作用。

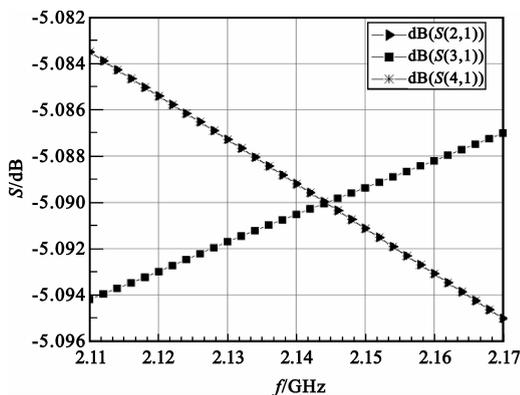


图 6 插入损耗的 ADS 仿真结果

Fig.6 ADS simulation results of insertion loss

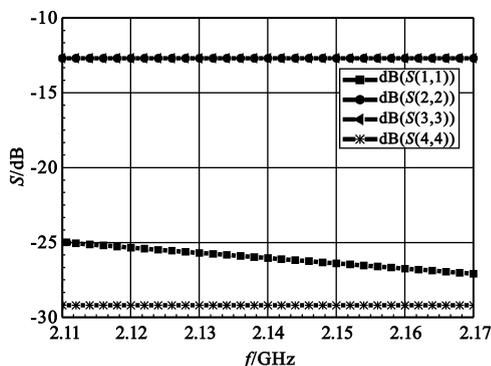


图 7 回波损耗的 ADS 仿真结果

Fig.7 ADS simulation results of return loss

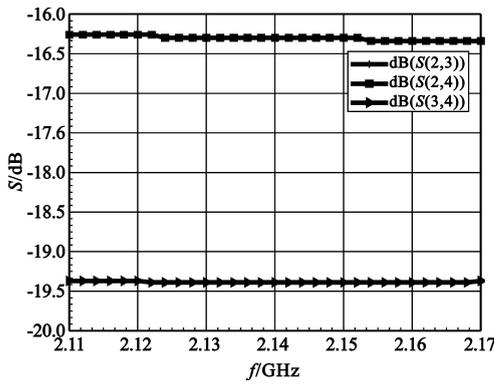


图 8 隔离度的 ADS 仿真结果  
Fig.8 ADS simulation results of isolation

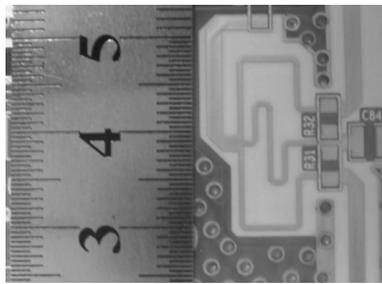


图 9 三路功分器实物图  
Fig.9 Fabrication of the three-way power divider

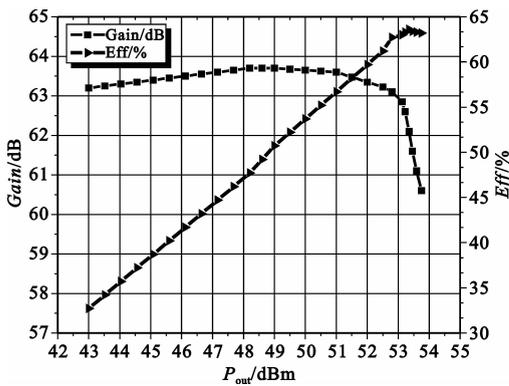


图 10 饱和功率、效率、增益测试曲线  
Fig.10 Testing results of saturation power, efficiency and gain

经验证明 ADS 软件对无源微波器件的仿真结果准确性较高,因此没有将设计的功分器电路单独制作试验模块电路进行测试验证,而是直接应用于功放电路,将仿真得到的功分器和功放电路一同进行 PCB layout 布局设计,功分器电路局部实物如图 9 所示。对功放电路进行测试,以验证功分器的性能,测试结果如图 10 所示,该功放在输出饱和功率时的效率高于典型的两路 Doherty 功放效率<sup>[8-9]</sup>,效率高于 50%。这说明设计思路中,上下两臂的 Peak 路功放同时开启工作,推高输出功率,提高饱和点效率的

原理设计的正确性,也说明了三路对称结构功分器的设计在功放电路的设计中起到了关键作用,由于功分器结构的完全对称,使得上下两臂 Peak 路功放可以同时开启,且保证两 Peak 路功放管工作状态完全相同。功放良好的性能证明了设计的三等分功分器满足了要求。

## 5 结 论

针对三路 Doherty 功放的应用环境,本文设计了工作频段为 2 011 ~ 2 017 MHz 的对称结构三等分 Wilkinson 微带功分器。首先简要介绍了 Doherty 功放基本原理以及功放电路对前端功分器的设计要求,然后分析了二进制的三等分功分器在结构上的不足之处。在此基础之上,设计了对称结构三等分 Wilkinson 微带功分器电路。ADS 软件联合电磁仿真结果显示,在工作频段内,该功分器插入损耗小于 0.4 dB,输出端口隔离度大于 16 dB,端口回波损耗大于 13 dB,各项指标良好。在适应三路 Doherty 功放对称结构的前提下,功分器性能指标满足功放电路三路相位一致性设计要求,提高了放大器效率,测试结果显示功放电路在饱和点工作效率超过 50%,高于通常的两路 Doherty 功率放大器。该对称结构三路等分功分器在功放电路上应用结果良好,验证了分析方法和电路设计的正确性,显示了该三路等分功分器良好的功分比、相位一致性、高隔离度、低插入损耗、良好的端口驻波比以及匹配性能。

本文的研究工作说明了三路对称 Doherty 射频功放电路的设计关键点除了功放管选型和功放链路设计之外,还应该考虑前端三路功分器的设计,特别是对上下两臂性能指标要求完全一致,是本课题的难点和关键点。此外,研究工作还说明,对于 Doherty 射频功放的设计,后端设计何种类型的主链路、何种 Carrier 和 Peak 功放管的搭配模式,前端就应该对应设计相适应的功分网络,以保证 Carrier 和 Peak 路功放的功率分配比例和功放管的工作状态,从而达到推高功放输出功率和提高功放工作效率的设计目标。由于目前描述三路 Doherty 功放设计,或者三路 Doherty 功放中功分网络设计的文献很少,因此本文的研究工作对三路 Doherty 功放电路中功率分配网络的设计具有工程借鉴意义。

该功分器目前仍然存在一些问题,从仿真图可以看出,端口②与④的隔离度较差,其原因是:由于

对称结构上的限制,端口②与④之间没有隔离电阻,造成了隔离度较差。在本次试验版本电路中没有特别要求提高端口②与④的隔离度,而特别强调要求提高端口②与③、③与④的隔离度的主要原因是,②与④端口的负载均为 Peak 大功率管,输入功率量级相当,相互影响较小,而端口③的负载为 Carrier 路小功放管,输入功率量级明显小于②、④端口的负载,为了避免 Peak 路大功率管对 Carrier 小功放管产生影响,因此要求②与③、③与④的隔离度更高一些。同时,输出端口③的回波损耗较大,也与隔离电阻的失配有关。为了进一步提高功放的性能,消除 Peak 路大功率管对 Carrier 路小功放管的影响、减小两路 Peak 大功率之间的影响,优化3个输出端口的隔离电阻的设计,提高②与④端口的隔离度,降低端口③的回波损耗,是下一步功分器设计研究工作的关注重点问题。

#### 参考文献:

- [1] 向永波,王明光.线性 Doherty 功放的优化设计[J].微波学报,2010,26(1):72-75.  
XIANG Yong-bo, WANG Ming-guang. Optimized Design of Linear Doherty Power Amplifier [J]. Journal of Microwaves, 2010,26(1):72-75. (in Chinese)
- [2] Kim J H, Cho C S, Lee J W, et al. Linearity improvement of Class - E Doherty amplifier using game cancellation[J]. Electronic letters,2008, 44(5):359-360.
- [3] Kenneth J Russell. Microwave Power Combining Techniques [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1979, 27(5):472-478.
- [4] Stephen Horst, Ramanan Bairavasubramanian, Manos M Tentzeris, et al. Modified Wilkinson Power Divider for Millimeter wave Integrated Circuits[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2007,55(11):2439-2446.
- [5] 陈焱,郝跃,冯辉,等.率合成电路在氮化镓放大器中的应用[J].微波学报,2010,26(1):58-62.  
CHEN Chi, HAO Yue, FENG Hui, et al. Application of Power Combining circuit on GaN Amplifier[J]. Journal of Microwaves, 2010,26(1):58-62. (in Chinese)
- [6] David M Pozar. Microwave Engineering Third Edition [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2006.
- [7] 徐兴福.ADS2008 射频电路设计与仿真实例[M].北京:电子工业出版社,2009.  
XU Xing-fu. ADS2008 RF circuit design and simulation Example[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2009. (in Chinese)
- [8] Cho Kyoung Joon, Hwang In Hong, Kim Wan Jong. Linearity optimization of a high power Doherty amplifier[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2005,15(11):748-750.
- [9] David W Beishline, Cedric Cassan, Elbadawy A Elsharad. Highly efficient 60W WCDMA LDMOS power amplifier using the modified Doherty configuration[C]//Proceedings of the 34th European Microwave Conference. Amsterdam, Horizon House:IEEE,2004:1-5.

#### 作者简介:

陈 慰(1983—),男,陕西紫阳人,2006年于西北工业大学获工学学士学位,现为助理工程师,主要研究方向为天线与微波技术;

CHEN Wei was born in Ziyang, Shaanxi Province, in 1983. He received the B. S. degree from Northwestern Polytechnical University in 2006. He is now an assistant engineer. His research direction is antenna and microwave technology.

Email:victor.chen1023@foxmail.com

陶学敏(1987—),女,重庆江津人,2009年于咸阳师范学院获理学学士学位,现为重庆大学硕士研究生,主要研究方向为天线与微波技术;

TAO Xue-min was born in Jiangjin, Chongqing, in 1987. She received the B. S. degree from Xianyang Normal University in 2009. She is now a graduate student. Her research direction is antenna and microwave technology.

Email:xeon.my.tao@foxmail.com

赵 娜(1984—),女,陕西大荔人,2010年于西安电子科技大学获理学硕士学位,现为助理工程师,主要研究方向为天线与微波技术。

ZHAO Na was born in Dali, Shaanxi Province, in 1984. She received the M. S. degree from Xidian University in 2010. She is now an assistant engineer. Her research direction is antenna and microwave technology.

Email:kldzn2004@163.com